



ARTÍCULOS DE REVISIÓN

Orígenes de la oscilación del sur “El Niño”

Víctor F. Vásquez¹; Gabriel Dorado Pérez²; Teresa Rosales Tham³

¹Director del Centro de Investigaciones Arqueobiológicas y Paleoecológicas Andinas (ARQUEOBIOS), Apartado Postal 595, Trujillo (Perú), CE: vivasa2401@yahoo.com; ²Dep. Bioquímica y Biología Molecular, Campus Rabanales C6-1-E17, Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba (Spain), CE: bb1dopeg@uco.es; ³Director del Laboratorio de Arqueobiología de la Universidad Nacional de Trujillo, Avda. Universitaria s/n, Trujillo-Perú, CE: teresa1905@hotmail.com

RESUMEN

Se presenta una revisión y discusión sobre los modelos paleoclimáticos que explican el origen de la oscilación del sur “El Niño” en el Cenozoico, mediante las pruebas paleogeográficas y paleoceanográficas recuperadas del océano pacífico en el Eoceno, Plioceno y Pleistoceno. Estos indicios indican que el origen de El Niño sería el Plioceno. En el Pleistoceno hay pruebas de oscilaciones entre El Niño y “La Niña”. Las consecuencias evolutivas de El Niño en los organismos marinos del pacífico oriental no están aún claras, pero los restos de peces pueden servir para estudiar mejor El Niño en el Pleistoceno final y Holoceno temprano.

Palabras clave: clima, ciclos, trópicos, corrientes marinas, aguas cálidas, aguas frías, lluvias, desastres naturales.

ABSTRACT

We present a review and discussion of a palaeoclimatic model that considers that the “El Niño”-Southern Oscillation (ENSO) phenomena started in the Cenozoic period. We provide paleogeographic and paleoceanographic evidences recovered from the Pacific Ocean dating from the Eocene, Pliocene and Pleistocene. The available data indicate that the origin of El Niño could be dated to the Pliocene and the Pleistocene, and also that there were oscillations between El Niño and “La Niña”. The evolutionary effects of the ENSO among the Eastern Pacific marine organisms are not yet clear, but fish remains can be useful to further study the ENSO occurrences during the Terminal Pleistocene and Early Holocene.

Keys word: climate, cycles, tropics, marine currents, hot waters, cold waters, rain, natural disasters.

Introducción

Los primeros estudios para entender la variabilidad del clima fueron realizados por el científico inglés Gilbert Walker (Walker, 1923). Por varios años se realizaron observaciones de los cambios de la presión atmosférica en América del Sur y en la región Indo-Australiana, y se detectaron que estos cambios ocurrían en sentido opuesto. Las observaciones mostraban que en años en que la presión atmosférica en la región Indo-Australiana era en promedio más baja que lo normal, en el océano Pacífico oriental era más alta. A este cambio en sentido opuesto de la presión atmosférica en ambas regiones, en periodos de dos a cuatro años, se le denominó Oscilación del Sur (OS), siendo publicado por Walker en 1923 (Walker, 1923).

En 1969 el meteorólogo noruego Jacob Bjerknes (Bjerknes, 1969) estableció que había relaciones de la OS y las fluctuaciones de temperatura del océano Pacífico en ambos lados. Estas relaciones se dan cuando una zona subtropical de alta presión está conectada con fuertes vientos alisios.

Estos ocasionan fuertes afloramientos, y por lo tanto bajas temperaturas en la superficie marina frente a las costas sudamericanas y en el ecuador. Si estas condiciones están muy marcadas, con predominio de vientos alisios del sudeste, especialmente fuertes y temperaturas muy bajas, el fenómeno recibe el nombre de “La Niña”.

La relación contraria se presenta cuando hay un debilitamiento de la celda de Hadley, por la presión de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI) hacia el sur, que provoca una disminución de la presión atmosférica en la zona de presión alta subtropical. Como consecuencia se produce el debilitamiento de los vientos alisios, disminuyendo el afloramiento y aumentando la temperatura del océano. Este aumento de temperatura del océano corresponde al inicio de un fenómeno que recibe el nombre de corriente u oscilación del sur “El Niño” (en inglés, “El Niño-Southern Oscillation”; ENSO), porque fue observado por pescadores del puerto de Paita (norte de Perú) en la época de Navidad y por tanto de la celebración del nacimiento del Niño Jesús.

ENSO es una respuesta al intercambio del movimiento angular entre la litosfera y la hidrosfera cuando ocurren cambios en la velocidad de la rotación terrestre. Así, en la época glacial, la mayor velocidad de rotación que debió tener la tierra, por menor carga oceánica en la zona ecuatorial, podría haber impedido la ocurrencia de un evento como El Niño. Sin embargo en el último máximo glacial este se hizo persistente (Morner, 1993).

Recientes estudios demuestran que El Niño que ocurre en el Pacífico oriental (EP-El Niño; del inglés Niño se ha vuelto más común durante este siglo, y se desarrolla en el centro del Pacífico. Este tipo de evento de El Niño, denominado El Niño del Pacífico Central (CP-El Niño; del inglés, “Central Pacific”) o El Niño Modoki, se diferencia de El Niño en el Pacífico Oriental (EP-El Niño) por la localización de anomalías de las máximas de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) y teleconexiones tropicales en latitudes medias (Ashok y Yamagata, 2009).

En este artículo se analizan las anomalías y cambios que se sucedieron en el Pacífico occidental y oriental. El estudio se basa en pruebas de eventos de El Niño en el Cenozoico, usando la reconstrucción de los gradientes de las TSM en ambos lados del Pacífico y la posición de la ZCI que ocurre en una posición más septentrional durante la fase de El Niño. No abordamos en este trabajo las pruebas de la ENSO en las costas sudamericanas del Holoceno, porque es un tema amplio que será tratado en otro trabajo.

Los especialistas en este tema han utilizado diversos indicadores para estas reconstrucciones. Se discuten aquellas más adecuadas para el entendimiento del rastreo y origen de la ENSO, como la paleogeografía, los microfósiles planctónicos, geoquímica inorgánica de foraminíferos y geoquímica orgánica de sedimentos. Se debe tener en consideración que la sucesión de los eventos han sido análogos al presente, a excepción de aquellos factores como gases de invernadero, cobertura de hielo y radiación solar, que deben haber sido diferentes en el pasado (Martínez, 2009).

Pruebas de la ENSO en el Eoceno

A principios del Cenozoico, entre el Paleoceno y el Oligoceno, se produjo la tercera y última fase de la fragmentación del supercontinente Pangea. A inicios del Eoceno, el territorio que daría lugar al actual continente australiano todavía se encontraba unido al territorio que formaría la Antártida (Figura 1).

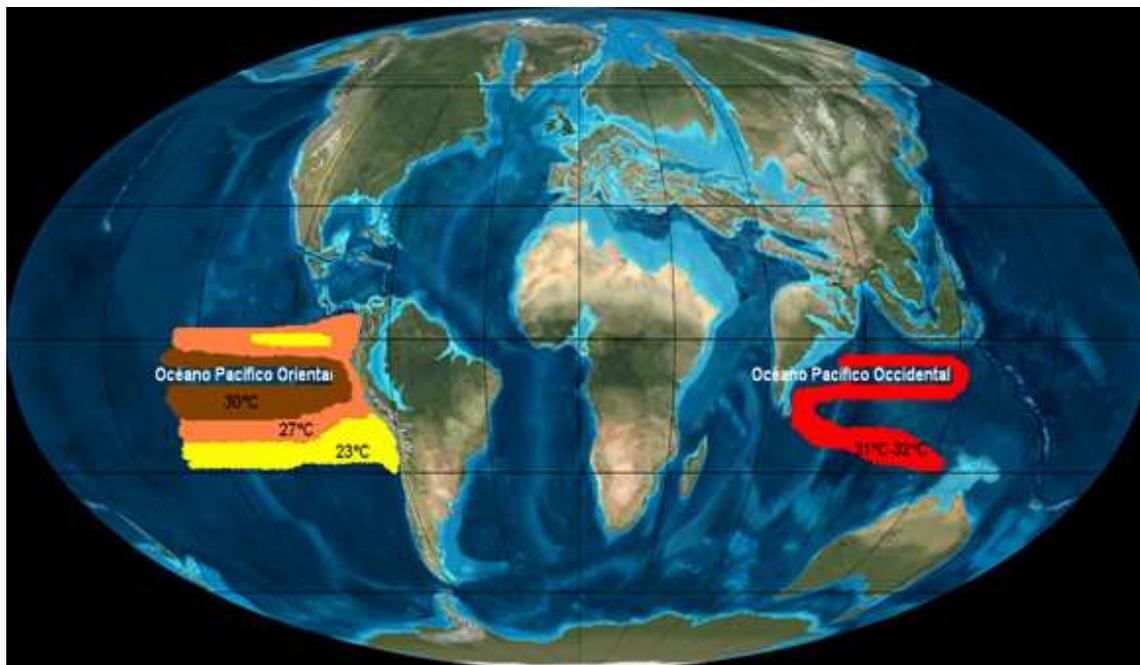


Figura 1. Escenario paleogeográfico del Eoceno. Se muestran las reconstrucciones de las TSM en el océano Pacífico oriental y occidental, según el modelo de Huber y Caballero (2003), y la distribución de los continentes, que muestra el desplazamiento de ambos polos. Fuente: <<http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/mollglobe.html>>, (derechos de Ron Blakey, NAU Geology) con datos de TSM tomados de Huber y Caballero (2003).

También las vías marítimas panameña y de Indonesia fueron despejadas, lo cual ha servido para argumentar una profundización de la termoclina en el Pacífico oriental o bancos de arena en el Pacífico occidental, que trajo como resultado una reducción de la inclinación media de la termoclina y un sistema de Bjerknes debilitado (Huber y Caballero, 2003).

Por otro lado, el aislamiento del continente antártico, ocurrido en esta era geológica, produjo consecuencias drásticas sobre el clima global, como el máximo térmico del Paleoceno-Eoceno, y un indicador que sugiere la existencia de un fenómeno tipo El Niño de forma permanente.

Ello se produciría por la mediación de la circulación termohalina, que implica una reducción de la diferencia de temperaturas entre la superficie y las profundidades del océano, que habría ocasionado una alternancia de períodos fríos (La Niña) con períodos cálidos (El Niño) y un débil impacto en la ZCI (Huber y Caballero, 2003).

Los indicadores geológicos sugieren que las temperaturas continentales del Eoceno se encontraban por encima de 0 °C y las temperaturas de las profundidades del océano eran 10 °C más altas que actualmente. Las reconstrucciones de las TSM para el óptimo climático del Eoceno temprano (52 a 50 Ma) son las más altas de todo el Cenozoico, y habrían alcanzado latitudes altas. Los indicios de estas condiciones cálidas y húmedas durante el Eoceno están sustentados también por la presencia de una flora con predominio de las Malpighiaceae (malpigiales), *Alchornea* (euforbiáceas) y *Podocarpus* (coníferas) y una alta diversidad de plantas de bosque tropical (Martínez, 2009).

Los datos disponibles y el modelo empleado por Huber y Caballero (2003) para la formación de El Niño en el Eoceno son insuficientes por la falta de indicadores como los gradientes de TSM de ambos lados del pacífico. Aunque existen registros de varvas, provienen de lagos de latitudes medias, y se trata de datos indirectos, aunque pueden ser utilizados para estudiar su variabilidad en el pasado, en virtud de la fuerte influencia que ejerce El Niño y las teleconexiones en las regiones de latitud media.

Nuevas pruebas, como los registros plurianuales del clima del Eoceno temprano, a partir de conchas de bivalvos y madera, indican el efecto invernadero en el clima de esta época, cuando la temperatura media global fue 6 °C más alta que hoy. Las periodicidades mostradas entre bivalvos y la madera, que provienen de la península antártica, son coherentes entre si y estimadas para un modelo climático acoplado océano-atmósfera, que demuestran fuertes teleconexiones para el Eoceno (Ivany *et al*, 2009).

En este panorama de un calentamiento global generalizado, los especialistas indican que es posible que la fase de El Niño hubiera adquirido un carácter permanente en el Eoceno, tal como propone la hipótesis que Huber y Caballero (2003). También se indica que es posible que El Niño habría sido un evento permanente, porque hay una ausencia de registros marinos de alta resolución capaces de captar la variabilidad climática a escalas anuales para el

Eoceno (Martínez, 2009), aunque las nuevas pruebas de bivalvos y madera fósil que proceden de la península antártica, pueden brindar nueva información para esta época.

ENSO en el Plioceno: ¿permanente o intermitente?

En el transcurrir del Plioceno, el clima se hizo más frío, seco y estacional, parecido a algunos climas modernos. La Antártida se congeló, permaneciendo cubierta con hielo durante todo el año, evento que sucedió posiblemente antes de que empezara el Plioceno. La formación de una capa de hielo ártico hace tres millones de años (Ma) está señalada por un brusco cambio en las concentraciones de isótopos de oxígeno (VanAndel, 1994).

Este cambio hacia un clima frío, seco y estacional, tuvo grandes impactos en la vegetación del Plioceno, reduciendo las especies tropicales a nivel mundial, e incrementando los bosques caducifolios y de coníferas en gran parte del norte y sur de los polos. Las selvas tropicales se limitaron a una estrecha banda alrededor del ecuador y aparecieron los desiertos en Asia y África.

La paleogeografía de esta era geológica indica que los continentes continuaron su deriva hacia las posiciones actuales. América del Sur se unió a Norteamérica a través del istmo de Panamá durante el Plioceno (Figura 2), lo que trajo como consecuencia una radiación de fauna entre el sur y el norte, y el fin casi total de la distintiva fauna marsupial sudamericana (Zamora, 2002).

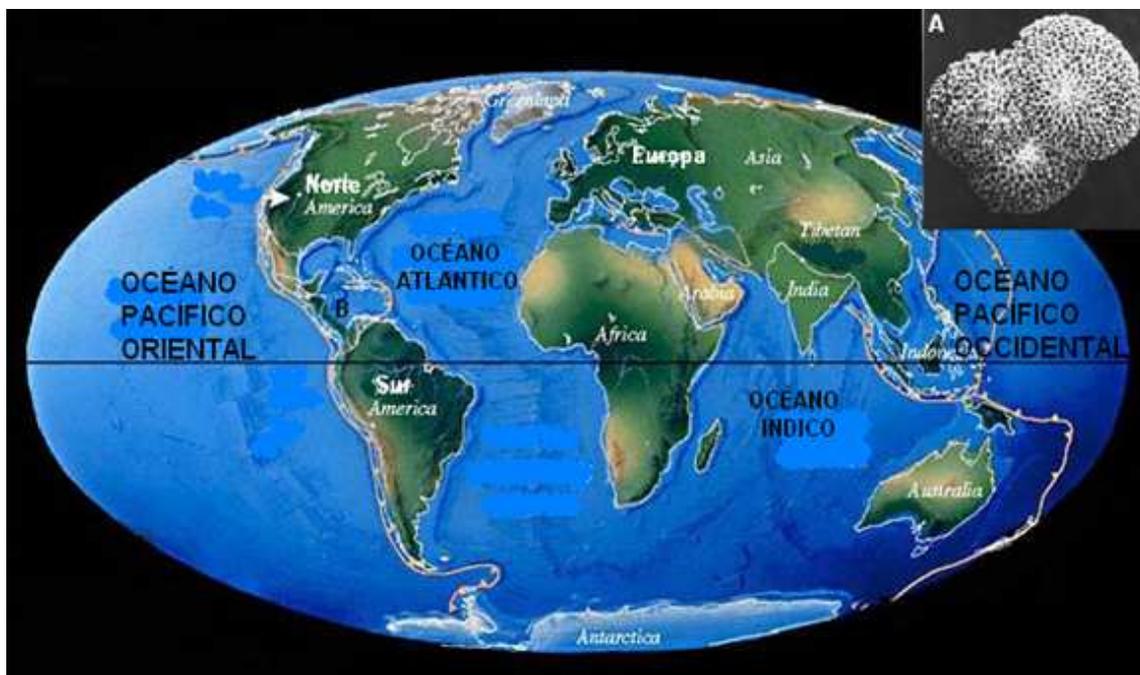


Figura 2. Escenario paleogeográfico del Plioceno. Se muestra la cuenca del océano Pacífico en ambos lados. (A) Foraminífero *Globigerina sacculifer* del cual se obtuvieron los registros de TSM. (B) Cierre del istmo de Panamá, bloqueando el paso de corrientes entre los océanos Pacífico y Atlántico. Fuente: <<http://rainforestradio.com>>

Por otro lado, la formación del istmo de Panamá tuvo grandes consecuencias sobre las temperaturas globales, porque las corrientes ecuatoriales cálidas (corriente circum-ecuatorial) interrumpieron su paso por este istmo, lo que inició un proceso de enfriamiento en el Atlántico y en otros océanos.

Sin embargo, los océanos permanecieron relativamente cálidos durante esta época, a pesar del enfriamiento constante, como es el caso del océano Pacífico, lo cual ha permitido conocer algunas características asociadas con El Niño (Wara *et al*, 2005; Fedorov *et al*, 2006) y con La Niña (Rickaby y Halloran, 2005), como se describe a continuación.

Fedorov *et al* (2006) explican los mecanismos para un permanente El Niño en el Plioceno, mediante dos modelos. El primer modelo implica una perspectiva polar, donde los modelos de circulación atmosféricos arrojan resultados que indican que la eliminación de hielo en el norte aumentó la temperatura inicialmente sólo en las regiones cubiertas con hielo, siendo además las TSM altas en las latitudes altas, pero sin cambios en latitudes bajas. Las TSM altas en las latitudes altas permitieron mantener las condiciones cálidas del Plioceno temprano, posiblemente por el mayor transporte de calor hacia el polo por las corrientes oceánicas durante el inicio del Plioceno, por el cierre del istmo de Panamá, así como el albedo y los ciclos de Milankovitch. Sin embargo este modelo no permite explicar las condiciones cálidas del Plioceno temprano, cuando aún no se había cerrado el istmo de Panamá.

El segundo modelo está basado en una perspectiva tropical, según el cual las diferencias entre la TSM del este y oeste del Pacífico eran muy pequeñas hasta hace aproximadamente 3 Ma.. Asimismo, este modelo indica que las frías aguas superficiales estuvieron ausentes de las zonas costeras de surgencia frente a las costas occidentales de África y las Américas. Esto implica que si hay una gran reducción en el gradiente de temperatura de este a oeste a lo largo del ecuador terrestre en el océano Pacífico, lo cual se produce durante el fenómeno de El Niño, y por lo tanto debió ser un evento continuo y no intermitente hace 3 Ma. (Fedorov *et al*, 2006).

Anteriormente, un equipo de la Universidad de California (Departamento de Ciencias del Océano) también propuso condiciones de un permanente El Niño para el Plioceno temprano, utilizando datos del gradiente de TSM, $\delta^{18}\text{O}$ y proporciones de magnesio y calcio (Mg/Ca) medidas en conchas de foraminíferos (corregidas para eliminar la variabilidad de las fluctuaciones de los periodos glacial-interglacial). Los datos indicaban que la diferencia del gradiente de TSM de oeste a este fue relativamente pequeña entre 5,3 y 1,7 Ma. Así, las TSM fueron 2° C más frías en el este y 2° C más caliente en el oeste, con un promedio de 1,5° C a 0,9° C. Estas diferencias en algunas zonas equivalían a un 35% de Mg/Ca (Wara *et al*, 2005).

Estas pruebas paleoceanográficas indican que la zona ecuatorial del océano Pacífico se habría caracterizado por una termoclina uniforme y más profunda, con ausencia de la masa de aguas frías. La zona ecuatorial de

surgencia del pacífico oriental fue más cálida, con reducción del gradiente de la TSM de oeste a este a lo largo del ecuador. Por otro lado, las condiciones del subsuelo fueron más simétricas en la zona tropical del Pacífico, lo que sugiere una condición permanente de El Niño durante el Plioceno temprano. Estas interpretaciones se fundamentan en los patrones observados, teniendo en cuenta las diferencias de porcentajes de foraminíferos planctónicos, las curvas de los isótopos de oxígeno en los foraminíferos planctónicos de las zonas occidental y oriental del Pacífico, así como del registro de polvo eólico de la zona oriental del océano Pacífico (Martínez, 2009).

Sin embargo, los estudios de Wara *et al* (2005) y Fedorov *et al* (2006) se contraponen al estudio realizado por Rickaby y Halloran (2005). Estos últimos llegaron a la conclusión de que la zona oriental del océano Pacífico fue más fría (y no caliente) en el Plioceno temprano, en base a los registros de Mg/Ca en tres especies de foraminíferos planctónicos de las zonas ecuatoriales orientales y occidentales del Pacífico, los cuales están en contra de un fenómeno permanente de El Niño en el Plioceno.

El estudio de los foraminíferos en general, y en especial de *Globigerina sacculifer*, muestran que dicha especie se calcifica en la capa de mezcla. Ello indica que la TSM de la zona occidental del pacífico se mantuvo más caliente y relativamente estable que la de la zona oriental. También indica que la termoclina ecuatorial del océano Pacífico tenía una inclinación más extrema durante el Plioceno, lo que implica fuertes vientos alisios, mayor afloramiento oriental y condiciones similares a La Niña (Rickaby y Halloran, 2005).

Sin embargo, esta interpretación ha sido cuestionada debido a la baja resolución estratigráfica del estudio paleoceanográfico y al mayor volumen de indicios en favor de un escenario tipo El Niño (Fedorov *et al*, 2006). Por otro lado, hay que tener en cuenta la complejidad introducida por la formación del istmo de Panamá. Así, sus efectos se habrían hecho sentir en la reorganización de la circulación marina en la zona oriental del océano Pacífico y en el balance de la salinidad superficial entre los océanos Atlántico y Pacífico (Martínez, 2009). El flujo de agua superficial que se dirigía del Atlántico al Pacífico fue bloqueada con el cierre del istmo de Panamá entre 4,7 y 4,2 Ma, por lo que lo más probable debió ser un fenómeno permanente de El Niño en el Plioceno.

El Cuaternario: pruebas de El Niño y La Niña en el Pleistoceno

El Pleistoceno comenzó hace unos 2,59 Ma. y finalizó hace unos doce mil años (ka), siendo precedido por el Plioceno y seguido por el Holoceno. El enfriamiento y la aridez progresiva fueron la característica que predominó en esta época y en el interior del Círculo Polar Ártico. La tundra se extendía sobre el permafrost, y mas al sur de éste ya se había instalado la aridez, la cual propició la sustitución del chaparral por el desierto y semidesierto (VanDerHammen, 1974; Pillans y Naish, 2004).

Las pruebas existentes para la reconstrucciones de El Niño durante la transición del Pleistoceno medio (hace 850 ka), el último periodo interglacial (hace 125 ka) y el último glacial máximo (hace aproximadamente 20 ka) son

variadas. Dichos indicios proceden de los estudios de isótopos de oxígeno, la reconstrucción de las paleotemperaturas de las TSM y las pruebas de la composición florística (Martínez, 2009).

Los estudios de secuencias multidecadales de corales marinos, a través de los últimos 130 ka, indican que El Niño estuvo en funcionamiento durante todo este tiempo. Por otra parte se han estudiado los indicadores relacionados con los cambios de vegetación, especialmente la relación de Cyperaceae (juncos) a Poaceae (gramíneas) como respuesta de la vegetación a la humedad (relación alta) y sequía (relación baja) en las superficies terrestres esclerófilas y pantanos. Dichas investigaciones indican que la proporción de Cyperaceae a Poaceae ha fluctuado considerablemente a lo largo de los últimos 45 ka, lo que sugiere una alternancia entre condiciones más húmedas (El Niño) y secas (La Niña) (Turney *et al*, 2004).

Por otro lado, la reconstrucción de las TSM, a partir de la relación Mg/Ca en foraminíferos planctónicos, en núcleos de las zonas occidental y oriental del océano Pacífico, sugiere condiciones relativamente constantes en la primera zona en relación a la segunda, que habrían descendido 2 °C durante el Pleistoceno medio. Por lo tanto, la diferencia entre zonas de la TSM habría sido mayor a 4° C, en la transición del Pleistoceno medio hasta el último periodo interglacial. Ello indica primero una condición El Niño durante el Pleistoceno temprano, y luego una condición tipo La Niña en el Pleistoceno tardío (DeGaridel-Thoron *et al*, 2005).

Sin embargo, en un escenario marino tipo La Niña postulado para el Pleistoceno tardío, debería esperarse una mayor precipitación en la zona occidental del océano Pacífico y condiciones más áridas sólo para algunas regiones de América del Sur durante el último máximo glacial. Pero las pruebas paleontológicas (continentales y oceanográficas) no apoyan dicha hipótesis. Según Martínez (2009), estos indicios demuestran que las actuales teleconexiones de El Niño no son las mismas que para el último máximo glacial. Una posible explicación de estas diferencias, es que habría un descenso de la TSM de 3 °C a 4 °C y una precipitación reducida en la zona occidental del pacífico occidental (Martínez, 2009).

Se han llevado a cabo reconstrucciones de las TSM para el último máximo glacial, a partir de Mg/Ca en foraminíferos de los sedimentos del fondo marino, cerca de las Islas Galápagos. Las TSM de la lengua de agua fría varían coherentemente con los cambios inducidos por la estacionalidad en los últimos 30 ka. Se observó un enfriamiento de 1,2 °C, lo que implica además una disminución de los gradientes de temperaturas tropicales, debilitamiento de la celda de Hadley y circulación Walker, así como un cambio hacia el sur de la ZCI. Ello indica un persistente efecto de El Niño durante esta época (Koutavas *et al*, 2002).

Un estudio geoquímico de un núcleo del Pleistoceno final, colectado al oeste de Lima, apoya la interpretación de un escenario tipo La Niña. Ello se debe a que los indicios de actividad intensa de El Niño sólo aparecen después de 17 ka; es decir, dos a tres ka después del último máximo glacial (Rein *et al*,

2005). Resultados similares se obtuvieron mediante el análisis de $\delta^{18}\text{O}$ en el foraminífero planctónico *Neogloboquadrina dutertrei* de las costas del pacífico de Costa Rica. La desviación estándar de los datos sugiere que los episodios de El Niño ocurridos en los últimos 50 ka disminuyeron de manera constante durante el último máximo glacial, alcanzando un mínimo de variabilidad (Leduc *et al*, 2009).

Las reconstrucciones paleoclimáticas del Pleistoceno están sustentadas por registros sedimentarios de resolución regular. Es necesario en este caso realizar una integración multidisciplinaria para reconstruir con precisión el modelo paleoclimático y la variabilidad de El Niño en el último máximo glacial. Tal es el caso de las bandas anuales que se forman en los corales, que ofrecen una oportunidad única para determinar el funcionamiento de El Niño durante los diferentes estados climáticos del pasado. Ello es debido a que los corales registran la información climática con una alta resolución (mensual en el desarrollo de su crecimiento y en la química de su exo-esqueleto).

La integración multidisciplinaria debe abarcar estudios polínicos, faunísticos y aquellos relacionados con la evolución y zoogeografía de especies marinas como moluscos, cirrípedos, peces, aves y mamíferos. Los organismos biológicos resultan muy informativos porque pueden ser usados como especies bioindicadores. El estudio de dichos organismos permitirá obtener información muy valiosa para determinar cómo ha cambiado la corriente peruana o de Humboldt en el Cuaternario.

Consecuencias evolutivas del origen de El Niño

La variabilidad genética de las especies, generada por mecanismos como mutaciones, recombinaciones génicas y transposicionales, produce un gran número de genotipos que se manifiesta en numerosos fenotipos. Las características fenotípicas determinan la viabilidad de una especie o grupo de especies, según presenten caracteres favorables o desfavorables para sobrevivir en un ambiente específico o ecosistema en un momento dado.

Los mecanismos de selección natural según Darwin, como mecanismos para la supervivencia de los más aptos, se apoyan en una serie de factores. Por una parte está la variabilidad entre los individuos de una especie, que puede representar un número elevado de genotipos. Por otra parte, la tasa reproductiva puede permitir a una especie formar poblaciones numerosas. La lucha por la supervivencia implica la adaptación de una población a una serie de factores abióticos y bióticos, y por lo tanto es determinante del tamaño de cada población. Así, los mejor adaptados al ambiente en el que viven sobrevivirán y dejarán descendencia, transmitiendo así las mejores combinaciones génicas, y por tanto, fenotipos específicos y adaptados a unas condiciones ambientales determinadas.

El fenómeno de El Niño posiblemente surgió por primera vez entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano, donde las condiciones paleogeográficas y paleoceanográficas permitieron el choque de aguas frías y calientes en las costas del la zona oriental del océano Pacífico. Este fenómeno debió afectar a

los organismos y comunidades marinas de la zona oriental del océano Pacífico. El cambio debió ocasionar una mortalidad masiva de especies, con la consiguiente extinción de las menos adaptadas. Los descendientes de las comunidades marinas con las mejores combinaciones génicas para adaptarse al nuevo medio son las que actualmente viven en la zona oriental del océano Pacífico.

No obstante, no se han encontrado pruebas fósiles del impacto del inicio del fenómeno de El Niño en las comunidades marinas de la zona oriental del océano Pacífico oriental. Hay pruebas paleofaunísticas de los cambios ocurridos en el Plioceno temprano y medio, como es el caso de la extinción total de los marsupiales sudamericanos. Aunque, básicamente, la fauna del Plioceno es similar a la moderna, como en el caso de los cormoranes (*Phalacrocorax*) de la formación del Mio-Plioceno de Pisco. Los elementos óseos de estos restos son similares a los del actual "cormorán", "guanay", "pato lilo" o "pato de mar" (*Phalacrocorax bougainvillii*), que es un ave típica de las frías aguas de la corriente de Humboldt (Urbina y Stucchi, 2005).

Sin embargo, se han encontrado formas intermedias en otras especies, como el pez espinoso (*Gasterosteus doryssus*), que muestra fluctuaciones en la cintura pélvica cada 5.000 años, aproximadamente (Zamora, 2002). Esto demuestra que en algunas especies pueden existir cambios importantes en escalas de tiempo cortas, mientras que pueden haber cambios escasos o nulos en escalas de tiempo mayores (por ejemplo, 23 Ma), como es el caso del cormorán previamente descrito.

Por otro lado, es bien conocido que el registro fósil es escaso e incompleto. De modo que es frecuente que falten los estadíos intermedios de la transición de una forma a otra. Obviamente, ello representa un importante problema para poder reconstruir la historia evolutiva del pasado. En el caso de los eventos de El Niño desde el Plioceno hasta el Holoceno moderno, la mayoría de los individuos y especies que perecieron serían consumidos por depredadores mejor adaptados al nuevo ecosistema. Así, en los desastres naturales causados por El Niño de 1982-83 y 1997-98 se demostró la extinción y la supervivencia de determinadas especies y poblaciones. Por otro lado, hay que tener en cuenta que el ciclo intermitente de El Niño permite romper el aislamiento del ecosistema marino de la zona oriental del océano Pacífico, con una periodicidad media aproximada de al menos una vez en cada década.

Los peces gato (Siluriformes) tienen una larga historia geológica. Estos animales ya estaban ampliamente diversificados durante el Cretácico. En la actualidad se encuentran ampliamente distribuidos, ocupando diversos ecosistemas de aguas dulces y saladas, incluyendo el océano Pacífico. Los peces gato incluyen especies muy competitivas, que pueden alcanzar grandes tamaños y pesos, desplazando e incluso extinguiendo otras especies, como se ha demostrado en casos de su introducción como especies exóticas. Los fósiles más antiguos conocidos de este grupo de peces tienen al menos 72 Ma. En este orden destacan los Ariidae, donde se encuentra un pez marino muy común en los registros del mar peruano, conocido como "bagre de faja" (*Galeichthys peruvianus*) (Lundberg, 1992).

Los Ariidae tienen una distribución circum-tropical en las plataformas continentales, sin posibilidad de dispersión a través del océano abierto. Por ello, es probable que hayan surgido antes de la separación final de Gondwana, que ocurrió al menos hace unos 84 Ma. Por lo tanto, es posible que los *Galeichthys*, distribuidos hoy en día en aguas subtropicales, hayan ocupado exitosamente el extremo sur del supercontinente gondwánico, conformado por África, América del Sur y la Antártida. De este modo también se puede explicar la presencia de tres de sus cuatro especies vivientes en el sur de África, evento de aislamiento que también se sustenta con el cierre del flujo entre los océanos Pacífico y Atlántico con la emergencia del istmo de Panamá (Betancur, 2003).

La Antártida no se congeló hasta hace unos 37 Ma. Por lo tanto, una posibilidad es que los *Galeichthys* que ocuparon la costa occidental de Gondwana (hoy en día la zona del océano Pacífico de América de Sur) habrían sido obligados a dispersarse hacia el norte a medida que las aguas frías ocupaban el extremo sur del continente. De esta manera podrían haber llegado hasta las costas del Perú. Alternativamente, los *Galeichthys* podrían haberse dispersado al norte del ecuador, pero esto implicaría una distribución ancestral del grupo en aguas tropicales y subtropicales, de lo cual no hay registro fósil (Betancur, 2003).

La cladogénesis es un suceso de bifurcación evolutiva en el que cada rama y sus sub-ramas más pequeñas constituyen un "clado". Se trata de un proceso de evolución adaptativa que conduce hacia el desarrollo de una mayor variedad de organismos. A menudo se compara con el proceso llamado anagénesis, donde los cambios graduales conducen hacia el desarrollo de una especie nueva que sustituye a la antigua; es decir, no hay "bifurcación" en el árbol filogenético (Soler, 2002).

Por lo tanto, el mejor escenario para explicar la distribución subtropical disyunta de los *Galeichthys* es un proceso evolutivo de tipo parsimonioso. Ello implica la cladogénesis en la parte sur del supercontinente formado por América del Sur, África y Antártida. Posteriormente a la separación gondwánica final habría ocurrido la dispersión hacia el norte en el pacífico americano, a medida que las aguas se enfriaban.

Este mecanismo evolutivo implica que el ancestro de *Galeichthys peruvianus* tiene una larga historia, incluso mucho antes del Cretácico. La especie comenzaría a migrar hacia su posición actual entre el Eoceno y el Plioceno, épocas con escenarios de El Niño permanente o intermitente. Ello indica que es una especie perfectamente adaptada a estos ecosistemas, y por tanto adecuada para el registro y reconstrucción de TSM ancestrales.

Todas las evidencias filogenéticas en relación a *Galeichthys peruvianus*, indican que el trabajo de Andrus *et al*, (2002) en lo que se refiere al uso de los otolitos de esta especie para uso como agente (del inglés, "proxy") en la reconstrucción de las TSM del holoceno de la costa norte, serían adecuadas, y por lo tanto una buena elección como especie para el monitoreo de El Niño en el pasado, por todas las características filogenéticas, paleogeográficas y

evolutivas de *Galeichthys*, aunque la identificación taxonómica de los otolitos ha sido objetada por Bearez *et al*, (2003).

Por lo tanto, los restos de Ariidae, especialmente de *Galeichthys peruvianus* de yacimientos del Pleistoceno y Holoceno de las costas de Perú y Ecuador, se consideran como buenos indicadores para reconstruir los climas del pasado, por su larga historia evolutiva y porque presentan interesantes procesos de especiación vicariante y cladogénesis.

Actualmente se conoce que las pesquerías de esta especie incrementan ostensiblemente con los fenómenos de El Niño. De hecho, han ampliado su distribución en los seis últimos fenómenos de El Niño que han ocurrido en la costa peruana (Kameya *et al*, 2001). Este comportamiento parece ser la consecuencia de una larga especiación y adaptación a estos fenómenos cíclicos, desde hace más de 84 Ma.

Conclusión

Inicialmente, Rollins *et al* (1986) propusieron que el fenómeno de El Niño se originó en el periodo Cuaternario; concretamente en la época del Holoceno. Sin embargo, diversos estudios multidisciplinarios posteriores (incluyendo indicadores paleogeográficos y paleoceanográficos), han permitido obtener pruebas que sugieren que dichas oscilaciones cíclicas existían en el periodo del Neógeno; concretamente entre las épocas del Plioceno y Mioceno. Algunos autores como Huber y Caballero (2003) han propuesto incluso un origen anterior, durante el periodo del Paleógeno; concretamente en la época del Eoceno. Existe incluso la posibilidad de un inicio más temprano aún, durante el periodo Cretácico. Son por tanto necesarias nuevas investigaciones para concretar con mayor precisión el origen de este fenómeno.

Referencias Bibliográficas

- Andrus, F., Crowe, DE., Sandweiss, DH., Reitz, EJ. y Romanek, CS. 2002 Otolith $\delta^{18}O$ Record of Mid-Holocene Sea Surface Temperatures in Peru. *Science* 295: 1508-1511.
- Arntz, W. y Fahrbach, E. 1996. 'El Niño: experimento climático de la naturaleza'. Fondo de Cultura Económica, México. 312p.
- Ashok, K., y T. Yamagata, 2009. The El Niño with a difference? *Nature*, 461: 481-484.
- Béarez, P., T. J. DeVries, Ortlieb, L. 2003. Comment on "Otolith $\delta^{18}O$ record of mid-Holocene sea surface temperatures in Peru". *Science* 299:203a.
- Betancur-R. 2003. Filogenia de los bagres marinos (Siluriformes: Ariidae) del Nuevo Mundo. Tesis de Maestría. Convenio Universidad Nacional de Colombia – INVEMAR Bogotá D.C. y Santa Marta D.T.C.H., Noviembre de 2003. Pp. 122.
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial. *Pacific Mon. Weather Rev.* 97, 163-172.
- DeGaridel-Thoron, T., Rosenthal, Y., Bassinot, F., Beaufort, L. 2005. Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years. *Nature* 433:294-298.

- Fedorov, A.V., Dekens, P.S., McCarthy, M., Ravelo, A.C., de Menocal, P.B., Barreiro, M., Pacanowski, R.C., Philander, S.G. 2006. The Pliocene Paradox (Mechanisms for a Permanent El Niño). *Science* 312:1485-1489.
- Huber, M., Caballero, R. 2003. Eocene El Niño: Evidence for robust tropical dynamics in the "Hothouse". *Science* 299:877-881.
- Ivany, L. C.; Brey, T.; Huber, M.; Buick, D.; Lomovasky, B.; Schone, B. R. 2009. ENSO-Scale Variability in the Eocene Greenhouse Recorded by Fossil Bivalves and Wood from Antarctica (Invited) American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #PP44A-06.
- Kameya, A.; Llellish, M. y Caccha, L. 2001. Los peces como indicadores de El Niño en el ecosistema marino peruano desde 1972 a 1998. *El Niño en América Latina: impactos biológicos y sociales*. J. Tarazona, W.E. Arntz y E. Castillo de Maruenda (Eds). CONCYTEC. Pp. 81-89.
- Koutavas, A., Lynch-Stieglitz, J., Marchitto, T.M., Sachs, J.P. 2002. El Niño-like pattern in ice age tropical sea surface temperatura. *Science* 297:226-230.
- Leduc, G., Vidal, L., Cartapanis, O., Bard, E. 2009. Modes of eastern equatorial Pacific thermocline variability: Implications for ENSO dynamics over the last glacial period. *Paleoceanography* 24: PA1203
- Lundberg, J. G. 1992. The phylogeny of ictalurid catfishes: a synthesis of recent work. Pp. 392-420. En: R. L. Mayden (Ed.), *Systematics, historical ecology and North American freshwater fishes*. Stanford University Press, Stanford, California.
- Martínez, J.I. 2009. La Historia Cenozoica del fenómeno de El Niño. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Volumen XXXIII, Número 129- Pp. 491-511.*
- Morner, N.A., 1993. Present El Niño-ENSO events and past Super ENSO events effects of changes in the earth's rate of rotation. *Bulletin Institut Francais d'Etudes Andines*, 22(1):3-12.
- Pillans, B., Naish, T., 2004. Defining the Quaternary. *Quaternary Science Reviews* 24, 2271–2282.
- Rein, B., Reinhardt, L., Sirocko, F., Wolf, A., Dullo, W.-C. 2005. El Niño variability off Peru during the last 20,000 years. *Paleoceanography* 20, PA4003.
- Rickaby, R.E.M., Halloran, P. 2005. Cool La Niña During the Warmth of the Pliocene? *Science* 307:1948-1952.
- Rollins, HB., Richardson II, JB., Sandweiss, DH. 1986. The birth of El Niño: geoarchaeological evidence. *Geoarchaeology* 1:3-15.
- Soler, M. 2002. Evolución: La base de la Biología (editor). Proyecto Sur de Ediciones, S.L.
- Turney, C.S.M., Kershaw A.P., Clemens S.C., Branch N, Moss P.T., Fifield, L.K. 2004. Millennial and orbital variations of El Niño/Southern Oscillation and high-latitude climate in the last glacial period. *Nature* 428:306-310.
- Urbina, M., Stucchi, M. 2005. Los Cormoranes (Aves: Phalacrocoracidae) fósiles de la formación Pisco. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* 99:41-49.
- VanAndel, T.H. 1994. *New Views on an Old Planet: a History of Global Change*. Segunda Edición. Cambridge University Press, XV.
- VanDerHammen, T. 1974. The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography* 1: 3-26.
- Walker, G.T. 1923. World weather. *I. Mem. Indian Meteorol. Dep.* 24, 75-131

- Wara, M.W., Ravelo, A.C., Delaney, M.L. 2005. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science* 309:758-761.
- Zamora, C. 2002. Evidencias a favor de la evolución. Pp. 57-73. En: Manuel Soler (Ed.), *Evolución: La base de la Biología*. Proyecto Sur de Ediciones, S.L.